



"Fondo Europeo Agricolo per lo Sviluppo Rurale:
L'Europa investe nelle zone rurali"



 Regione Emilia-Romagna

CO₂SINK/PEF

Progetto Co2SINK/PEF – Azione 5

Misurazione dei SINK delle Comunalie Parmensi e previsione della sua evoluzione nei prossimi cinquanta anni¹

Autori:

Fabio Iraldo e Nicola Fabbri, Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa

1. Introduzione	2
2. Metodologia	3
2.1 Calcolo degli stock e dei sink di carbonio per lo scenario BAU	3
2.1.1 Metodo 1: Linee guida IPCC	3
2.1.2 Metodo 2: parametri medi INFC	4
2.1.3 Metodo 3: dati di campo	5
2.2 CO2FIX	6
2.2.1 Parametri generali della simulazione	6
2.2.2 Incremento in volume	7
2.2.3 Carbonio presente a inizio simulazione e altri input	8
2.2.4 Scenari selvicoltureali	8
2.2.5 Suolo	9
2.2.6 Prodotti legnosi	10
2.2.7 Bioenergia	11
2.2.8 Altri moduli	12

¹ Si ringrazia Giorgio Vacchiano ed Edoardo Nevola dell'Università di Milano per il prezioso supporto fornito nell'analisi dei dati forestali e nell'applicazione del modello CO2FIX. Ogni errore di interpretazione e di applicazione del modello è da attribuirsi esclusivamente agli autori di questo report.

3. Risultati e Discussione	12
3.1 C stock e sink	12
3.2 CO2FIX	14
Conclusioni	16
Bibliografia	17

1. Introduzione

In Italia, il carbonio immagazzinato negli ecosistemi forestali è pari a 1,24 Gt, circa 142 t/ha, ovvero 4,5 Gt di CO₂ (Gasparini *et al.*, 2013). La maggior parte del carbonio organico delle foreste italiane è accumulato nei suoli, che contengono il 57,6% del carbonio totale, mentre il secondo serbatoio per importanza è la biomassa arborea epigea, che contiene il 38,1% del totale, circa 54,0 t/ha. Nella lettiera e nella necromassa sono invece accumulati rispettivamente il 2,0% e il 2,3% del carbonio organico totale. Nell'analisi dei flussi di carbonio in un ecosistema forestale non è quindi sufficiente limitarsi alla biomassa in quanto anche suolo, lettiera e necromassa sono importanti serbatoi, andando a costituire i cinque pool di carbonio riconosciuti dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

In foreste gestite, inoltre, il destino del carbonio immagazzinato nella biomassa epigea dipende dall'uso cui la biomassa è destinata: nel caso essa venga bruciata per produrre energia (come nell'80% dei casi per il legno prelevato in Italia e nelle stesse Comunalie Parmensi²), gran parte del carbonio torna immediatamente in atmosfera, mentre in carta, materiale da costruzione e altri prodotti di lunga durata esso rimane immagazzinato per decenni o addirittura secoli: risulta perciò rilevante considerare anche i prodotti legnosi e la durata della loro vita nella simulazione dei flussi di carbonio di un ecosistema forestale.

La capacità delle foreste di assorbire carbonio non è sempre costante, ma può variare a seconda dell'età degli alberi, dell'andamento climatico, della struttura della foresta, della mortalità da eventi estremi, della specie e della gestione selvicolturale adottata. In popolamenti molto maturi o molto densi, dove la competizione è maggiore, l'accrescimento degli individui e di conseguenza l'assorbimento di carbonio risultano quindi ridotti. Tuttavia, sia l'età media che la densità dei popolamenti possono essere influenzati con la gestione forestale tramite appropriati interventi selvicolturali. In particolare, l'assorbimento di carbonio può essere migliorato in tre modi: 1) proteggendo la foresta da agenti esterni (incendi, schianti da vento, patogeni), ad esempio riducendo il carico di combustibile e aumentando la stabilità meccanica dei popolamenti, evitando così che parte del serbatoio di carbonio vada perso e che l'assorbimento di carbonio venga interrotto a seguito dello stress o della mortalità da disturbo, 2) riducendo la respirazione eterotrofa e quindi la frequenza con cui il suolo resta scoperto, e 3) stimolando l'incremento legnoso

² Dati MIPAAFT, 2019 e Consorzio Comunalie Parmensi.

mantenendo densità e quindi competizione non eccessive. Interventi selvicolturali atti a rendere le foreste più resistenti e resilienti agli estremi climatici, previsti in aumento nei prossimi decenni, creano perciò serbatoi di carbonio più stabili, con emissioni ridotte rispetto a quelle che si potrebbero verificare in seguito a disturbi naturali che colpiscono ripetutamente foreste a turno lungo e alta densità di carbonio nella biomassa.

Per realizzare il massimo assorbimento di carbonio e limitare le perdite dai serbatoi forestali esistenti è quindi fondamentale prevedere nel dettaglio le dinamiche dello stock e del sink forestale nel tempo. Simulare la dinamica futura dei flussi di carbonio in dipendenza dai diversi tipi di gestione selvicolturale permette ad esempio di comprendere il tipo di intervento migliore per massimizzare l'assorbimento di carbonio e per valorizzare i servizi ecosistemici forniti dalla foresta, nonché di quantificare la differenza rispetto a uno scenario di continuazione della selvicoltura corrente o "business as usual" (BAU).

Uno degli obiettivi del Progetto CO2SINK/PEF è quello di misurare l'assorbimento di carbonio da parte degli ecosistemi forestali delle Comunalie Parmensi e di prevedere l'evoluzione dello stock e sink carbonio per i prossimi 50 anni. Il lavoro è diviso in due fasi:

- Calcolo della baseline dei serbatoi (stock) e degli assorbimenti (sink) di carbonio per una Comunalìa rappresentativa del sistema delle Comunalie, la Comunalìa di Pontolo, utilizzando i coefficienti IPCC e quelli dell'Inventario Forestale Nazionale (Gasparini *et al.*, 2013) per poi confrontarli con la stima precedentemente effettuata utilizzando dati prelevati sul campo
- Analisi della dinamica temporale dei cinque serbatoi di carbonio tramite il modello di simulazione CO2FIX per i prossimi 50 anni in tre scenari (1. BAU, 2. Implementazione di interventi selvicolturali di prevenzione dei disturbi e 3. Destinazione del legno a prodotti con maggior durata), nonché per stimare le differenze tra i vari scenari e quindi conoscere i benefici apportati da una gestione selvicolturale e/o destinazione dei prodotti migliorata.

2. Metodologia

2.1 Calcolo degli stock e dei sink di carbonio per lo scenario BAU

Per stimare l'entità dei serbatoi e degli assorbimenti di carbonio nelle foreste delle aree di studio è innanzitutto necessario conoscere la quantità di carbonio attualmente contenuta ed assorbita dai popolamenti forestali in questione. Questa stima è stata effettuata utilizzando tre diverse metodologie, in modo da poter eseguire un confronto tra i risultati ottenuti ed evidenziarne il progressivo raffinamento.

2.1.1 Metodo 1: Linee guida IPCC

La prima metodologia adottata ha visto utilizzare i valori standard delle linee guida IPCC, forniti come intervallo in base a clima, zona ecologica e continente nel manuale "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" (IPCC, 2006, 2019) (Tab. 1).

In particolare, per la stima degli stock e dei sink sono stati utilizzati i valori standard di biomassa riportati dal Volume 4 “Agriculture, Forest and Other Land Uses” rispettivamente nelle tabelle 4.7 e 4.9. Per il calcolo del carbonio epigeo questi valori sono stati quindi moltiplicati per il coefficiente di densità di carbonio pari a 0.47 (IPCC, 2019), mentre per il calcolo del carbonio ipogeo sono stati precedentemente moltiplicati per il fattore di espansione della biomassa radicale riportato nella tabella 4.4.

Per la stima del carbonio negli altri tre pool forestali sono invece stati impiegati i valori presenti alle tabelle 2.2 e 2.3 rispettivamente per la stima del carbonio in lettiera e necromassa e per quello nel suolo.

Tabella 1: valori impiegati per il calcolo di serbatoi e assorbimenti di carbonio secondo linee guida IPCC (IPCC, 2006)

Valore		Biomassa epigea media (min-max) (t/ha)	Crescita annua biomassa epigea (t/ha)	Carbonio in lettiera (t/ha)	Carbonio in necromassa (t/ha)	Carbonio in 0-30cm suolo (t/ha)
Fonte IPCC 2006 Vol.4 AFOLU		Cap. 4 Tab 4.7	Cap. 4 Tab 4.9	Cap. 2 Tab 2.2	Cap 2 Tab 2.2	Capitolo 2 Tabella 2.3
Comunalia di Pontolo (PR)	Latifoglie	120 (20-320)	4.0 (0.5-7.5)	23.9 (4.6-64.4)	23.6 (1.6-150.0)	64+-5%
	Conifere			66.3 (6.0-279.1)	22.1 (2.1-59.5)	
	Misto			47.8 (4.6-279.1)	23.0 (1.6-150.0)	

2.1.2 Metodo 2: parametri medi INFC

La seconda metodologia ha visto utilizzati i valori di fitomassa o carbonio forniti a livello di tipo forestale e di regione italiana nell'Inventario Forestale Nazionale (Gasparini *et al.*, 2013) (Tab. 2).

Per la stima dello stock di carbonio epigeo, i valori presenti nella tabella “Fitomassa arborea epigea” sono stati moltiplicati per il coefficiente di densità di carbonio pari a 0.47, mentre per il calcolo del carbonio ipogeo questi sono stati anche moltiplicati per il fattore di espansione della biomassa radicale pari a 0.23. Per la stima del carbonio negli altri tre pool forestali (lettiera, necromassa e suolo) sono invece stati impiegati i valori presenti rispettivamente nelle tabelle “Carbonio organico nella lettiera”, “Peso secco della necromassa totale”, e “Carbonio organico in orizzonti organici del suolo/totale del suolo minerale”. Infine, per il calcolo dei sink sono stati usati i valori di incremento corrente annuo presenti nella tabella “Incremento corrente di volume”.

Tabella 2: valori impiegati per il calcolo di serbatoi e assorbimenti di carbonio secondo il metodo INFC

Area di studio	Tipo forestale o specie dominante	Fitomassa arborea epigea (t/ha)	C lettiera (t/ha)	C necromassa (t/ha)	C suolo organico (t/ha)	C suolo minerale (t/ha)	Incremento corrente di volume (t/ha/anno)
Comunalia di Pontolo (PR)	abete rosso	159	1.7	6.9	3.5	102.4	14.9
	pino silvestre	57.9	2.8	2.4	3.6	62.9	3.2
	pino nero	161.8	7.1	3.5	2.6	68.5	7.3
	faggio	174.9	3.7	3.7	4.6	77.9	5.1
	castagno	110.4	2.1	15.6	0.7	77.4	5.7

2.1.3 Metodo 3: dati di campo

La terza ed ultima metodologia utilizzata ha visto impiegati i valori ottenuti elaborando i dati ricavati tramite rilievi sul campo o dai Piani di Assestamento Forestale³ (PAF). Per calcolare la quantità di carbonio contenuta nelle foreste in esame (stock), le misurazioni effettuate sul campo sono state trasformate in biomassa mediante equazioni matematiche. Innanzitutto, sono state stimate le altezze di tutti gli individui cavallettati a partire da quelle misurate sul campo tramite regressioni polinomiali tra diametro e altezza (Tab. 3). Utilizzando le altezze e i diametri a disposizione sono stati quindi calcolati i volumi cormometrici attraverso le equazioni allometriche allegate all'INFC 2005 (Tabacchi *et al.*, 2011) (Tab. 4). Una volta calcolati i volumi in m³/ha in base alle frequenze a ettaro di ciascuna classe diametrica, sono state quindi stimate le biomasse dei cinque serbatoi forestali individuati dall'IPCC tramite le formule riportate in Tabella 5 e i coefficienti specie-specifici di densità basale, fattore di espansione epigeo, e fattore di espansione per la biomassa radicale individuati per le principali tipologie delle foreste italiane dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (Vitullo *et al.*, 2007). Infine, la biomassa totale è stata convertita in tonnellate di carbonio ad ettaro utilizzando il coefficiente di densità di carbonio pari a 0.47. Per le particelle non cavallettate gli stock sono stati stimati fittando una regressione tra superficie di ciascuna particella [ha] e stock di carbonio [tC/ha] per ogni specie dominante.

Tabella 3: equazioni di regressione polinomiale utilizzate per la stima delle altezze (h). d = diametro individuo a 1,3 m dal terreno.

Area di Studio	Tipo forestale o Specie dominante	Equazione
Comunalia di Pontolo (PR)	Conifere	$h = 0.0002*d^3 - 0.0188*d^2 + 0.9884*d + 1.3$
	Faggio	$h = 0.0003*d^3 - 0.0307*d^2 + 1.1752*d + 1.3$
	Castagno e Nocciolo	$h = 0.0004*d^3 - 0.034*d^2 + 1.1197*d + 1.3$
	Altre latifoglie	$h = -0.0033*d^3 + 0.0787*d^2 + 0.2859*d + 1.3$

Tabella 4: equazioni utilizzate per la stima del volume cormometrico (Tabacchi *et al.*, 2011). d = diametro individuo a 1,3 m dal terreno; h = altezza.

Specie	Equazione
Carpino nero	$-1.4983+0.038828*d^2*h$
castagno	$-2.001+0.036524*d^2*h+0.74466*d$
faggio	$0.81151+0.038965*d^2*h$
frassino	$-0.11137 + 0.039108*d^2*h$
cerro	$-0.043221 + 0.038079*d^2*h$
roverella	$0.51025 + 0.045184*d^2*h-0.36026*d$
robinia	$-2.1214 +0.037123*d^2*h+0.14296*d$
salice	$-2.314+0.038926*d^2*h$
ontano	$-22.932+0.032641*d^2*h+2.991*d$
acero	$1.6905+0.037082*d^2*h$
altre latifoglie	$2.3118+0.031278*d^2*h+0.37159*d$
douglasia	$-7.9946+0.033343*d^2*h+1.2186*d$
pino strobo	$2.6279+0.03389*d^2*h$
pino silvestre	$3.1803+0.039899*d^2*h$
pino nero	$-21.48 +0.033448*d^2*h+2.9088*d$
abete rosso	$-9.1298+0.034866*d^2*h+1.4633*d$

³ Piano di Assestamento forestale della Comunalia di Pontolo (PR), valido per il periodo 2010-2020 e redatto dal Dott. For. Miriam Taburoni.

Tabella 5: formule impiegate per la stima della biomassa dei cinque serbatoi forestali individuati dall'IPCC. GS = volume epigeo [$m^3 ha^{-1}$], BEF = fattore di conversione biomassa, WBD = densità basale del legno [$t m^{-3}$], R = rapporto root/shoot che converte la biomassa epigea in biomassa ipogea, DCF = fattore di conversione da biomassa epigea in necromassa, A = superficie occupata dalla specifica tipologia forestale [ha], a-b-c-d = coefficienti specie specifici. (Vitullo et al., 2007)

Serbatoio forestale	Carbonio
Biomassa epigea	$GS*BEF*WBD*A$
Biomassa ipogea	$GS*WBD*R*A$
Necromassa	$GS*BEF*WBD*DCF*A$
Lettiera	$a*C \text{ epigeo} + b$
Suolo	$c*C \text{ epigeo} + d$

Per il calcolo del sink annuo di carbonio è stata innanzitutto eseguita, attraverso i software CDendro e CooRecorder, la misura dello spessore radiale degli ultimi dieci anelli dei campioni incrementali prelevati per ogni specie dominante e classe diametrica (<15cm, 15- 30cm, >30cm) nelle particelle cavallettate. Più precisamente, lo spessore degli anelli è stato utilizzato per calcolare il diametro del fusto all'anno 2010 con in quale, insieme alle regressioni altezza-diametro precedentemente utilizzate, sono stati stimati i volumi cormometrici all'anno 2010 facendo applicando le formule riportate in Tabella 4. Questi volumi sono stati quindi sottratti a quelli attuali, per ottenere l'incremento volumetrico degli ultimi dieci anni dei singoli alberi, poi trasformato in incremento di biomassa medio annuo epigea e ipogea. Per ogni classe diametrica è stato quindi calcolato un valore medio annuo di incremento di biomassa individuale, poi moltiplicato per le frequenze a ettaro di ciascuna classe diametrica, ottenendo così l'incremento di biomassa totale per ettaro in ogni particella, successivamente trasformato in incremento di carbonio (sink) semplicemente moltiplicando per il coefficiente di densità di carbonio pari a 0.47. Per le particelle non cavallettate si è proseguito ancora mediante delle regressioni tra superficie della particella [ha] e sink [tC/ha/anno] per ogni specie dominante.

2.2 CO2FIX

CO2FIX V 3.1 (Schelhaas et al., 2004) è un modello di simulazione empirico a scala di ecosistema che permette di stimare i serbatoi e i flussi di carbonio forestali in biomassa, suolo e nei prodotti legnosi. Il modello è diviso in sei moduli (biomassa, suolo, prodotti, bioenergia, economico e di accreditamento) e richiede come input, principalmente in forma tabellare, dati che sono solitamente ricavabili sul campo o da inventari nazionali e PAF. CO2FIX, nello specifico, lavora tramite un approccio a coorti ovvero "popolamenti forestali che presentano un simile tasso di crescita, mortalità e turnover e che è quindi possibile trattare come singola entità". Normalmente le coorti sono coetanee e monospecifiche. Il modello inoltre può simulare diverse tipologie di gestione forestale, interventi selvicolturali e destinazioni dei prodotti legnosi.

2.2.1 Parametri generali della simulazione

Le impostazioni generali permettono di creare gli scenari che si desidera simulare per una determinata area di studio, di scegliere le principali modalità di simulazione e di fornire l'età attuale e la composizione specifica delle coorti che si intendono considerare in ciascuno scenario. Per la quasi totalità delle simulazioni effettuate in questo lavoro, ogni coorte è stata associata a una

particella forestale in quanto la maggior parte di queste sono costituite da popolamenti simili in età, composizione e fisionomia. Gli scenari simulati per ogni area di studio sono tre: uno *business as usual (BAU)*, ovvero la continuazione delle pratiche selvicolturali attuali, uno con implementazione degli interventi selvicolturali per la riduzione della vulnerabilità a disturbi e uno per la generazione di prodotti legnosi a durata prolungata. La durata della simulazione è stata impostata a 50 anni.

2.2.2 Incremento in volume

Il modulo della biomassa è diviso in quattro compartimenti: fusto, foglie, rami e radici. Questo modulo calcola le variazioni nel serbatoio di carbonio della biomassa attraverso un bilancio tra il carbonio inizialmente presente, gli aumenti dovuti agli incrementi volumetrici e le perdite dovute a mortalità naturale e interventi selvicolturali. L'incremento corrente annuo del fusto (CAI, m³/ha/anno) è il parametro chiave del modulo biomassa. Da questo vengono poi ricavati quelli di foglie, rami e radici. Il CAI viene parametrizzato tramite curve di accrescimento per ogni specie ed area di studio, che devono essere fornite dall'utente. CO2FIX permette di parametrizzare l'incremento in funzione dell'età della coorte oppure della sua biomassa totale; è stata scelta la prima opzione, così da poter utilizzare i dati ottenuti dall'analisi delle carote incrementali prelevate durante le attività di campo. Da un lato sono quindi state calibrate regressioni lineari tra diametro ed età, utilizzando il conteggio totale degli anelli di ogni carota; dall'altro è stato calcolato il CAI medio per ogni specie e classe diametrica, e quindi età.

I valori di CAI sono stati validati contro curve incrementali costruite in modo indipendente tramite l'equazione di Richards, che modella l'incremento annuo in funzione della biomassa arborea epigea (e quindi indipendentemente dall'età della foresta) (Eq. 1). L'equazione è stata inizializzata con i valori di biomassa epigea rilevati in campo o forniti dai PAF per ciascuna particella, e con i coefficienti (α , k , ν) forniti dall'ISPRA per le rispettive specie e regioni di appartenenza delle tre aree di studio.

Equazione 1: formula di Richards (Vitullo et al., 2007)

$$I_t = \frac{dgss}{dt} \cdot A = \left(\frac{k}{\nu} \cdot gss \left[1 - \left(\frac{gss}{\alpha} \right)^\nu \right] + gss_0 \right) \cdot A$$

Dove:

I_t : incremento di biomassa [m³·anno⁻¹]

gss_t : stock di biomassa presente nell'anno t per ettaro di superficie [m³·ha⁻¹] (è stimato in funzione dello stock e delle utilizzazioni forestali nell'anno t).

gss_0 : incremento di stock di biomassa per ettaro di superficie in assenza di biomassa [m³·ha⁻¹·anno⁻¹]

α : parametro >0 [m³·ha⁻¹]

k : parametro [anni⁻¹] > 0

ν : parametro adimensionale $-1 \leq \nu \leq \infty$; $\nu \neq 0$

A : superficie forestale [ha]

Nello scenario basato su interventi selvicolturali "climate-smart", è stato necessario modificare le curve incrementali fornite a CO2FIX, per tenere conto dell'effetto positivo dei diradamenti sull'accrescimento individuale e del popolamento, in seguito al rilassamento della competizione per la luce. A questo scopo, il CAI relativo a ciascuna specie e classe di età è stato moltiplicato per un fattore >1 in funzione della riduzione percentuale del numero di piante per ettaro in ciascuna particella.

2.2.3 Carbonio presente a inizio simulazione e altri input

L'altro fondamentale parametro di input del modulo biomassa è il carbonio presente a inizio simulazione nei quattro compartimenti arborei (fusti, foglie, rami e radici) di ogni coorte. Questo input è stato ricavato suddividendo nei quattro compartimenti gli stock di carbonio epigeo, già calcolati per ciascuna particella e area di studio. La compartimentazione è stata effettuata calcolando la distribuzione relativa di biomassa epigea nei quattro comparti a partire da un dataset di equazioni allometriche specie-specifiche (Zianis *et al.*, 2005), che forniscono il volume o la biomassa epigea di ciascun comparto in funzione del diametro e dell'altezza di ciascun albero (Tab. 6).

Tabella 6: percentuale di biomassa in fusto, rami e foglie rispetto alla biomassa epigea totale (100%).

	Faggio	Querce, Carpino nero	Abeti, Douglasia	Pini	Castagno
Fusto	81%	77%	82%	74%	78%
Rami	17%	18%	13%	18%	18%
Foglie	2%	5%	5%	8%	4%

Ulteriori parametri di input sono:

- il coefficiente di densità di carbonio è stato assunto pari a 0.47 tC/t s.s. (IPCC, 2019)
- la densità del legno [t s.s./m³] delle specie di interesse è stata fissata a 0.68 per il faggio, 0.60 per il querce, 0.70 per il carpino nero, 0.60 per il castagno, 0.39 per l'abete rosso, 0.38 per l'abete bianco, 0.48 per la douglasia, 0.46 per il pino nero e silvestre
- i coefficienti di allocazione, necessari a ricavare l'incremento di biomassa nei comparti di foglie, rami e radici in funzione di quello del fusto, sono stati mutuati da Schelhaas *et al.* (2004). In alberi giovani la maggior parte della biomassa viene allocata in foglie, rami e radici, così come ad età matura; quando invece l'incremento del fusto è massimo, l'allocazione agli altri compartimenti diminuisce fino a un minimo del 20-30%. I coefficienti
- il *turnover rate* (tasso annuo di mortalità) di foglie, rami e radici è stato ricavato da un recente studio modellistico per le foreste italiane (Pilli *et al.*, 2013): 0.0025 per il fusto, 0.03 per i rami, 0.2 e 0.95 per le foglie rispettivamente di conifere e latifoglie, e 0.1 per le radici.
- la mortalità naturale annua è stata quantificata nel 2.5% del volume in piedi, utilizzando il valore medio del range 1 – 4% calcolato per boschi non diradati di foreste temperate (Harmon *et al.*, 2001).

2.2.4 Scenari selvicolturali

Uno dei parametri più importanti durante le simulazioni riguarda gli scenari selvicolturali. In CO2FIX è possibile simulare diradamenti e tagli di maturità, per i quali va indicata l'età della particella al momento dell'intervento, la frazione di biomassa che viene rimossa e il tipo di prodotti a cui verrà destinata quest'ultima. Nello scenario BAU, le informazioni circa la frazione di biomassa da rimuovere e le epoche di intervento sono stati ricavati dai piani dei tagli nei PAF limitatamente al

loro periodo di validità, mentre per il periodo non coperto sono state utilizzate assunzioni generiche circa la frazione di biomassa mediamente rimossa e i turni di taglio per categoria forestale, stabilite insieme ai gestori delle tre aree di studio (Tab. 7).

Nello scenario con implementazione degli interventi “climate-smart” sono stati simulati interventi addizionali, ricadenti in particelle forestali ad alta priorità di intervento (a causa di un maggior pericolo di incendio, schianto da vento e/o un minor assorbimento annuale di carbonio). Gli interventi addizionali si ipotizzano siano effettuati su una superficie di 90-100. Gli interventi riguardano principalmente avviamenti all’alto fusto in cedui invecchiati, asportazione di biomassa secca in eccesso e diradamenti selettivi di intensità maggiori rispetto a quelli attualmente previsti dai PAF (Tab. 7).

Per quanto riguarda l’allocazione della biomassa rimossa, CO2FIX consente di separare la frazione di fusto e rami che verrà destinata a *logwood* (tronchi da sega), *pulpwood* (cellulosa) o *slashwood* (redisui), e la parte di questi ultimi che sarà soggetta a combustione. Rispetto ai valori BAU, concordati con i gestori delle aree di studio, nello scenario con prodotti legnosi a più lunga durata è stata aumentata la frazione destinata a *logwood* e diminuita quella di *slashwood* (Tab. 8).

Tabella 7: frazione rimossa e epoca di taglio simulati per gli interventi selvicolturali dello scenario BAU quando non diversamente specificato a livello di particella.

Area studio	Specie o tipo forestale	Intervento BAU (frazione rimossa e età per l'intervento)	Intervento addizionale
Comunale di Pontolo e Setterone	Fustaia di faggio	0.25 – 15 anni (diradamenti) 0.9 (taglio di maturità)	+0.15/+0.25/+0.35 (44ha)
	Fustaia di conifere	0.2 – 20 anni (diradamenti) 0.9 (taglio di maturità)	+0.2 (49ha)
	Ceduo di castagno	0.2 – 25 anni	-
	Ceduo di faggio	0.3 – 35 anni	-
	Ceduo di nocciolo	0.2 – 30 anni	-
	Fustaia di protezione	0.2 – 30 anni (diradamenti)	-

Tabella 8: frazione di biomassa allocata in logwood-pulpwood-slashwood (% ardere) per tipo forestale e tipo di intervento (diradamento/maturità) nello scenario BAU e variazione apportata (frazione aggiunta a logwood) nello scenario con prodotti a più lunga durata.

Area studio	Specie o tipo forestale	Allocazione BAU	Variazione logwood
Comunale di Pontolo	Fustaia di faggio	0 – 0.5/0.7 – 0.5/0.3 (80%)	+0.1
	Popolamenti di conifere	0 – 0.5/0.6 – 0.5/0.4 (50%)	+0.1
	Ceduo di castagno	0 – 0.1 – 0.9 (90%)	+0.1
	Ceduo di faggio	0 – 0.1/0.2 – 0.9/0.8 (80%)	+0.1
	Ceduo di nocciolo	0 – 0 – 1 (80%)	+0.1

2.2.5 Suolo

Il modulo *soil* simula la dinamica del carbonio nel suolo mediante il modello Yasso (Liski *et al.*, 2003), che include tre comparti di lettiera (non legnosa, fine e grossolana) e cinque comparti per i processi di decomposizione e humificazione (estratti, cellulosa, lignina e due di humus). I parametri forniti come input sono dati climatici (temperature mensili medie e precipitazione totale durante la

stagione vegetativa), con i quali CO2FIX stima l'evapotraspirazione potenziale, e gli apporti annuali di biomassa da foglie, rami, radici e fusto ai comparti della lettiera [t/ha/anno] per ogni particella, che utilizzati da CO2FIX per calcolare il carbonio inizialmente presente nei vari comparti del suolo. Questi valori sono stati ricavati utilizzando i *turnover rate* fissati nel modulo *biomass* e applicati agli stock di carbonio precedentemente stimati per i vari comparti di biomassa epigea.

2.2.6 Prodotti legnosi

Il modulo dei prodotti traccia i flussi di carbonio nella biomassa legnosa da quando essa viene rimossa tramite gli interventi selvicolturali fino a fine vita. Per utilizzare il modulo necessario definire l'impiego cui i prodotti sono destinati e l'uso che se ne fa a fine vita (riciclo, discarica o combustione per bioenergia). La biomassa rimossa appartenente alle frazioni *logwood* e *pulpwood* può essere ora ulteriormente frazionata per la produzione di segati, tavole, carta o a biomassa da combustione (Tab. 9). Le informazioni riguardo la destinazione dei prodotti sono state ricavate dai gestori delle tre aree di studio; per l'allocazione dei prodotti a fine vita, gli anni di vita dei vari prodotti e il riciclo sono invece stati utilizzati i parametri di default forniti dal manuale di CO2FIX (Schelhaas et al., 2004) (Tab. 10).

Tabella 9: suddivisione della biomassa legnosa asportata per frazione e prodotto di destinazione

Area studio	Frazione	Segati	Tavole	Carta	Combustione
Comunalità di Pontolo (PR)	Logwood	0	0	0	1
	Pulpwood	-	0.6	0	0.4

Tabella 10: valori di default utilizzati per altri parametri del modulo prodotti

Destinazione (frazione)	Lungo termine	Medio termine	Breve termine
Segato	0.5	0.25	0.25
Tavole	0.3	0.5	0.2
Carta	0.01	0.1	0.89
Fine vita (frazione)			
	Riciclo	Energia	Interramento
Lungo termine	0.3	0.1	0.6
Medio termine	0.1	0.1	0.8
Breve termine	0.4	0.5	0.1
Riciclo (frazione)			
	Lungo termine	Medio termine	Breve termine
Lungo termine	0.1	0.3	0.6
Medio termine	-	0.1	0.9
Breve termine	-	-	0

	Emivita (anni)
Lungo termine	30
Medio termine	15
Breve termine	1
Discarica	5
Interramento	145

2.2.7 Bioenergia

Il modulo della bioenergia stima la riduzione di emissioni di CO₂ come conseguenza della sostituzione di combustibili fossili con biomassa legnosa, o di un aumento dell'efficienza della tecnologia di combustione. La mitigazione totale dipende quindi dalla quantità di biomassa che annualmente viene destinata a questo uso (proveniente da *slashwood* avviato a combustione e scarti della lavorazione primaria), dal contenuto energetico della biomassa utilizzata e dall'efficienza della tecnologia impiegata. A causa della ridotta disponibilità di informazioni riguardo questi parametri per le aree di studio analizzate, per tutti gli input necessari alla parametrizzazione del modulo bioenergia sono stati utilizzati i valori di default forniti dal manuale del software (Schelhaas *et al.*, 2004) (Tab. 11).

Tabella 11: valori di default utilizzati per la parametrizzazione del modulo bioenergia

Parametri legna da ardere			
Potere calorifico (MJ/kg)		15	
Potenziale di riscaldamento globale dei gas serra			
CO₂	1	CH₄	23
N₂O	270	CO	2
TNMOC	12		
Combustibile da sostituire, tecnologia di combustione sue emissioni (g/kg combustibile)			
Combustibile da sostituire	Carbone	Potere calorifico (MJ/kg)	28
Tecnologia	Stufa	Efficienza (%)	24
CO₂	2550	CH₄	7.98
N₂O	0.0372	CO	66.2
TNMOC	0.02		
Tecnologia per combustione di biomassa e sue emissioni (g/kg combustibile)			

Tecnologia	Stufa moderna	Efficienza (%)	25
CO₂	1550	CH₄	7.92
N₂O	0.06	CO	69.5
TNMOC	6.84		

2.2.8 Altri moduli

Finance. Il modulo finanza permette di considerare i costi e i profitti della gestione selvicolturale. Considerando che il progetto cui questo lavoro contribuisce prevede delle apposite azioni dedicate alla parte finanziaria, si è deciso di non simulare questo modulo in quanto più precisi risultati a riguardo verranno appunto forniti in una fase successiva del progetto.

Carbon. Il modello dei crediti di carbonio tiene traccia di tutti flussi da e per l'atmosfera nei diversi scenari simulati per stimare il risparmio in termini di carbonio rispetto allo scenario BAU. L'anno di inizio crediting è stato posto al 2022, così come l'anno della prima verifica. La durata del periodo di crediting è invece di 20 anni.

3. Risultati e Discussione

3.1 C stock e sink

La stima della quantità di carbonio attualmente stoccata ed assorbita dai popolamenti forestali della Comunalìa di Pontolo, effettuata mediante le tre metodologie precedentemente descritte, è riportata in sintesi nella tabella 12 e nella figura 1.

Comunalìa parmense di Pontolo

Tabella 12: valori medi dei 5 pool di C e dei C stock e sink totali nelle Comunalie parmensi di Pontolo e Setterone

Metodologia	C epigeo (t/ha)	C ipogeo (t/ha)	C lettiera (t/ha)	C necromassa (t/ha)	C suolo (t/ha)	Stock C (t/ha)	Sink CO ₂ (t/ha/anno)
IPCC	56.4	13.2	23.5	23.5	64.0	184.2	6.9
INFC	68.0	16.0	2.9	8.3	81.9	176.9	8.8
Rilievi	135.1	25.4	13.4	21.9	164.4	362.8	18.6

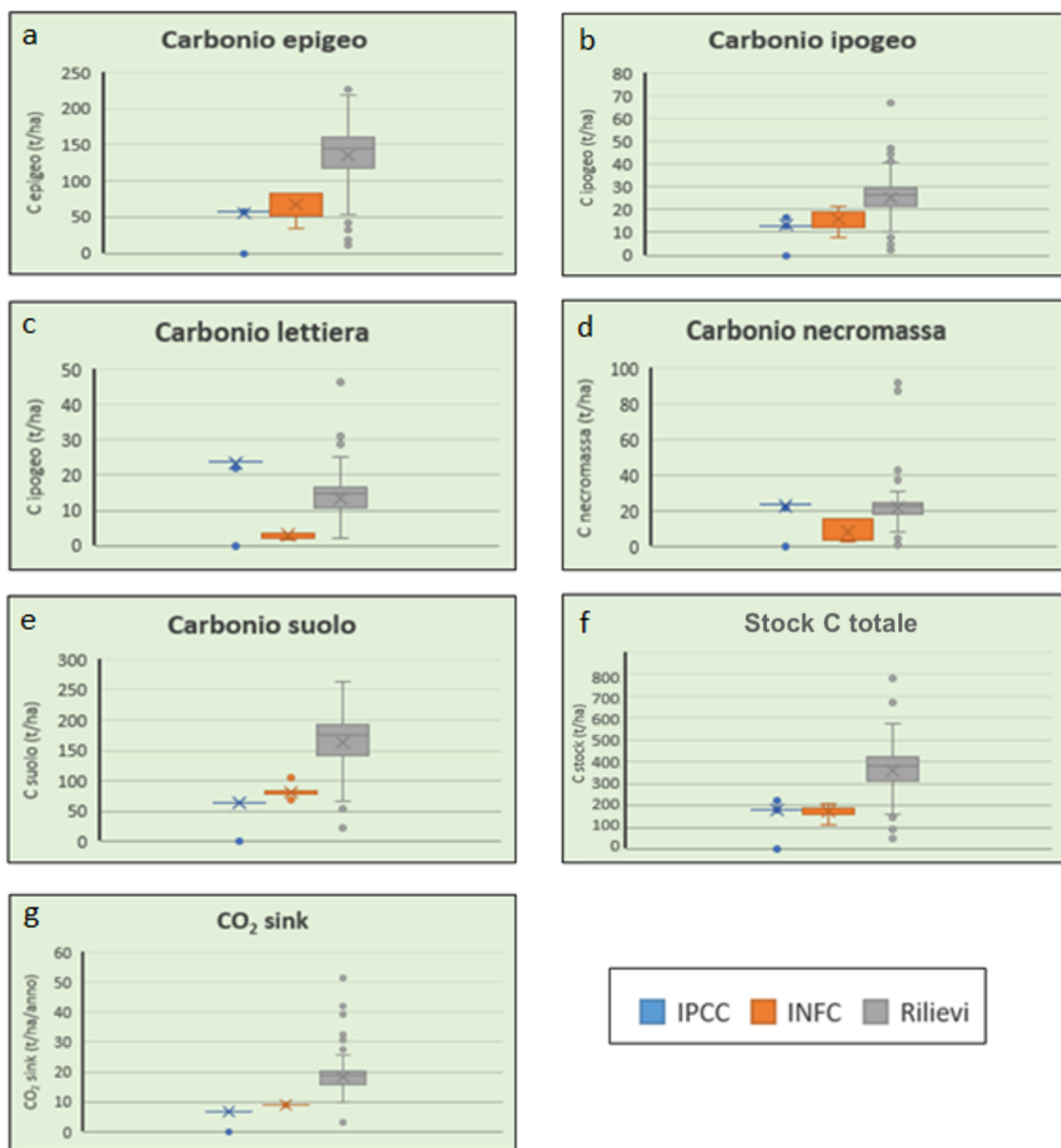


Figura 1: risultati dei 5 pool di carbonio e di stock e sink per le Comunalie parmensi di Pontolo e Setterone con le tre metodologie utilizzate

I risultati ottenuti evidenziano sia similarità che differenze tra le tre metodologie (1: valori IPCC, 2: valori INFC, 3: rilievi di campo e dati PAF) con cui sono state effettuate le stime dei pool e degli assorbimenti di carbonio per ogni area di studio. Questa sintesi dei risultati ottenuti rende quindi evidente come non vi sia una coerenza nel confronto tra le tre metodologie utilizzate: talvolta una certa metodologia fornisce stime molto maggiori o minori delle altre due, mentre in alcuni casi tutte e tre forniscono risultati simili o diversi.

Il sink di carbonio misurato da dati in campo e PAF è risultato sempre maggiore di quello stimato con coefficienti standard IPCC, ed è da ritenersi più affidabile. In particolare, il serbatoio di carbonio

nel suolo risulta sempre sottostimato sia dalla metodologia IPCC che dai coefficienti INFC rispetto alle evidenze di campo.

3.2 CO2FIX

Le simulazioni dei serbatoi e dei flussi di carbonio forestali effettuate tramite il modello CO2FIX hanno permesso di ricostruire la variazione del carbonio in biomassa, suolo, prodotti legnosi e bioenergia nei prossimi 50 anni (Fig. 2 a,b,c), e di stimarne la differenza tra lo scenario BAU e due scenari in cui sono stati rispettivamente implementati gli interventi selvicolturali “climate-smart” e migliorata la destinazione dei prodotti legnosi (Fig. 2 d).

Comunali parmensi di Pontolo

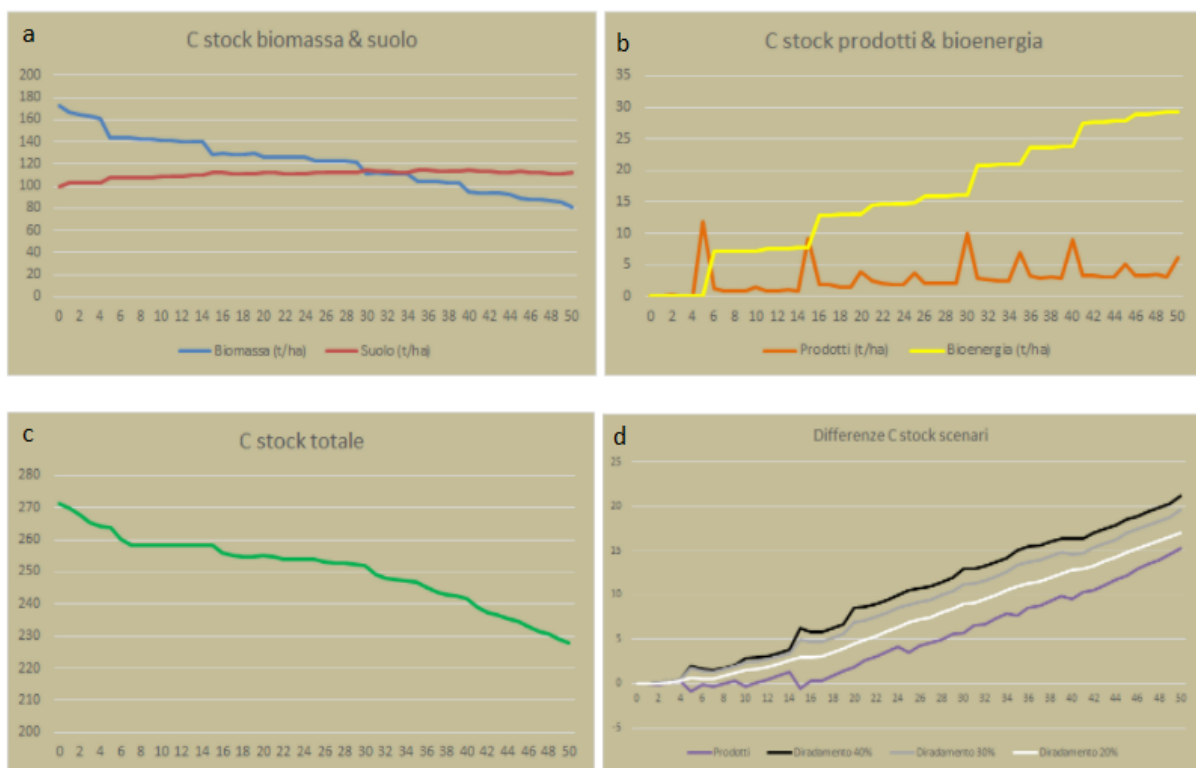


Figura 2: variazione dei pool di carbonio in 50 anni (a,b,c) e differenza tra lo scenario BAU e i due scenari alternativi simulati (d)

Le simulazioni mostrano come il maggior pool di carbonio forestale all’anno 50 sia quello del suolo, in linea quindi con le statistiche nazionali (MIPAAFT, 2019). Il secondo pool di carbonio è invece quello della biomassa, il quale mostra andamento opposto a quello del suolo con trend sempre decrescente col passare del tempo. Ciò è dovuto al fatto che il carbonio perso dalla biomassa a causa della mortalità naturale o di interventi selvicolturali è maggiore di quello acquisito con l’incremento legnoso annuo. Un motivo ulteriore può essere la elevata densità che caratterizza parte dei popolamenti forestali delle aree di studio analizzate: un’elevata densità comporta infatti intensa

competizione, riducendo l'incremento corrente e l'assorbimento di carbonio, che non riescono a compensare le perdite da mortalità naturale o selvicolturale.

Diverso andamento è invece mostrato dal carbonio contenuto nei prodotti legnosi e da quello mitigato grazie all'uso della bioenergia. Il trend di questi due pool è sempre crescente: in particolare, aumenta costantemente quello della bioenergia, mentre il carbonio accumulato nei prodotti legnosi ha un andamento altalenante. Quest'ultimo è conseguenza dell'uso cui i prodotti legnosi sono destinati: negli anni in cui vengono effettuati la maggior parte degli interventi selvicolturali, il carbonio trasferito nei prodotti aumenta velocemente; tuttavia, tutte le volte in cui i prodotti vengono destinati a biomassa da combustione, il carbonio viene anche presto rilasciato in atmosfera e di conseguenza quello immagazzinato nel modulo dei prodotti legnosi cala altrettanto velocemente. In ogni caso, il serbatoio dei prodotti legnosi e degli effetti di sostituzione da bioenergia è di uno o due ordini di grandezza più piccolo rispetto a quello della biomassa viva e del suolo, su base ettaro.

Ciò considerato, nello scenario BAU lo stock totale di carbonio mostra che la maggioranza dei popolamenti dell'area delle Comunalie, in cui lo stock complessivo di carbonio diminuisce nel corso degli anni a causa di una densità molto elevata, con tassi di incremento legnoso limitati. Questo, insieme alla mortalità da competizione, all'età matura dei popolamenti e ai prelievi selvicolturali più o meno consistenti, non sufficientemente compensati dalla permanenza del carbonio nei prodotti legnosi o dagli effetti di sostituzione della bioenergia, determina una emissione annua di carbonio che supera gli assorbimenti: la foresta, quindi, non costituirebbe più un serbatoio di carbonio bensì una fonte. In caso si verificassero disturbi naturali guidati da eventi meteorologici estremi, come incendi, schianti da vento o mortalità da siccità – al momento non previsti negli scenari simulati – la perdita di carbonio sarebbe ancora più pronunciata.

Questo trend può essere in parte contrastato tramite una migliore destinazione dei prodotti legnosi, o effettuando interventi selvicolturali che, modificando la struttura dei popolamenti, diminuiscono la competizione ed aumentano quindi l'incremento legnoso annuo degli individui e conseguentemente il carbonio assorbito. Per verificare l'effettivo beneficio apportato da questi due scenari, sono state effettuate apposite simulazioni. I risultati mostrano che in tutte e tre le aree di studio sia appropriati interventi selvicolturali che una destinazione dei prodotti legnosi a più lunga durata mitigano le perdite di carbonio rispetto allo scenario business as usual (BAU). Nell'area di studio delle Comunalie parmensi di Pontolo e Setterone gli interventi selvicolturali "climate-smart" arrecherebbero maggiori benefici rispetto ad un uso migliorato dei prodotti legnosi. In particolare, è possibile notare come ad un aumento nell'intensità dei diradamenti del 40%, 30% e 20% rispetto allo scenario BAU corrispondano aumenti proporzionali dello stock di carbonio, sempre rispetto alle pratiche selvicolturali correnti.

Quest'ultimo risultato trova riscontro nella letteratura scientifica. In particolare, è già stato verificato come l'aumento di incremento legnoso sia maggiore quando il diradamento è più intenso (Bianchi *et al.*, 2010), con una differenza rispetto a popolamenti non diradati di circa il 20-30% quando l'intensità dei diradamenti è del 30% (Kim *et al.*, 2016). Il diradamento diminuisce il grado di copertura delle chiome e la densità arborea nonché la competizione, aumentando così la disponibilità di risorse quali radiazione luminosa al suolo, acqua e nutrienti e di conseguenza,

proporzionalmente all'intensità dell'intervento, un accrescimento più vigoroso degli individui restanti. I diradamenti, inoltre, consentono di aumentare il diametro medio dei popolamenti e la stabilità fisica e biologica del soprassuolo nei confronti degli estremi climatici. Questi interventi selvicolturali porterebbero quindi benefici in tutte quelle particelle forestali in stato di abbandono, con individui deperenti, densità eccessiva ed elevata vulnerabilità agli eventi meteorologici estremi. L'assenza dei diradamenti invece può portare a elevata fragilità dei popolamenti, determinando mortalità o crolli e di conseguenza compromettendo quindi anche i servizi offerti dai popolamenti quale la difesa idrogeologica.

Un ulteriore beneficio può essere apportato dall'allungamento dei turni. Uno studio sui cedui di castagno (Marziliano *et al.*, 2013), categoria forestale diffusa nelle Comunalie Parmensi, ha ad esempio dimostrato come mentre con turni di 15 anni gli assortimenti sono prevalentemente di piccole dimensioni e paleria minuta (82%), turni di 10 anni più lunghi forniscono un aumento di più del 30% della paleria grossa, che aumenta ulteriormente con un turno di 50 anni. Ciò conferma quindi come con turni più lunghi sia possibile ottenere una diversificazione dei prodotti, con assortimenti di maggior pregio, e quindi immagazzinare una maggiore quantità di carbonio nei prodotti legnosi con minori emissioni immediate da combustione di biomassa. Inoltre, turni di taglio più lunghi permetterebbero di ridurre la vulnerabilità agli incendi, aumentando il diametro dei fusti (carattere di resistenza al fuoco) e diminuendo la continuità orizzontale e verticale del combustibile a causa dell'autodiradamento e all'autopotatura dei polloni.

Conclusioni

Il maggior assorbimento di carbonio generato da interventi selvicolturali "climate-smart" rispetto alla prosecuzione delle attuali pratiche selvicolturali è la base per generare crediti di carbonio per il mercato volontario, la cui vendita potrebbe supportare i costi degli interventi addizionali (Vacchiano *et al.*, 2018). Il mercato volontario dei crediti di carbonio potrebbe così compensare i costi extra delle buone pratiche selvicolturali, favorendone la diffusione sul territorio nazionale e invertendo l'abbandono e il degrado del paesaggio che attualmente caratterizza molte foreste delle aree interne del Paese, che rischia di aumentarne la vulnerabilità climatica e diminuire ulteriormente il loro potenziale di mitigazione.

Simulazioni come quelle effettuate per questo studio permettono di contabilizzare in anticipo il carbonio extra che verrebbe assorbito rispetto allo scenario BAU e quindi di calcolare i crediti di carbonio generati dall'implementazione di un'appropriata gestione selvicolturale. CO2FIX si è complessivamente dimostrato uno dei modelli più completi ed affidabili disponibili per la simulazione dei flussi di carbonio in ecosistema forestale, e uno dei pochi in grado di simulare dettagliatamente gli effetti di diversi tipi di interventi selvicolturali sulle dinamiche del carbonio a breve termine, anche per popolamenti disetanei. Un miglioramento ulteriore dei dati di input, utilizzando informazioni calibrate a scala locale, renderà possibile supportare adeguatamente la pianificazione forestale, programmando interventi selvicolturali in grado di mantenere o migliorare la fornitura di servizi ecosistemici e il sequestro di carbonio, così da bilanciare efficacemente

produttività, stabilità del suolo, protezione da disturbi naturali, integrità dell'ecosistema e mitigazione del cambiamento climatico.

Bibliografia

Collalti, A., Trotta, C., Keenan, T. F., Ibrom, A., Bond-Lamberty, B., Grote, R., Vicca, S., Reyer, C.P.O., Migliavacca, M., Veroustraete, F., Anav, A., Campioli, M., Scoccimarro, E., Sigut, L., Grieco, E., Cescatti, A., & Matteucci, G. (2018). Thinning can reduce losses in carbon use efficiency and carbon stocks in managed forests under warmer climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(10), 2427-2452.

Gasparini, P., Di Cosmo, L., & Pompei, E. (eds.) (2013). Il contenuto di carbonio delle foreste italiane. Inventario nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC2005. Metodi e risultati dell'indagine integrativa. Ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali, Corpo Forestale dello Stato; Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale, Trento, Italy..

Harmon, M. E., Krankina, O. N., Yatskov, M., & Matthews, E. (2001). Predicting broad-scale carbon stores of woody detritus from plot-level data. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., & Stewart, B.A. (eds.), *Assessment methods for soil carbon*, Lewis Publishers, pp. 533-552.

IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.

IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC, Bern, Switzerland.

Kim, M., Lee, W. K., Kim, Y. S., Lim, C. H., Song, C., Park, T., Son, Y., & Son, Y. M. (2016). Impact of thinning intensity on the diameter and height growth of *Larix kaempferi* stands in central Korea. *Forest Science and Technology*, 12(2), 77-87.

Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M., & Sievänen, R. (2005). Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling*, 189(1-2), 168-182.

Marziliano, P.A., Iovino, F., Menguzzato, G., Scalise, C., & Nicolaci, A. (2013). Aspetti dendroauxometrici, assortimentali e caratteristiche della necromassa in cedui di castagno. *Forest@*, 10(1), 14-25.

MIPAAFT (2019). RaF Italia 2017-2018. Rapporto sullo stato delle Foreste e del settore forestale in Italia. Compagnia delle Foreste, Arezzo, Italy.

Pilli, R., Grassi, G., Kurz, W. A., Smyth, C. E., & Blujdea, V. (2013). Application of the CBM-CFS3 model to estimate Italy's forest carbon budget, 1995–2020. *Ecological Modelling*, 266, 144-171.

Schelhaas, M. J., Van Esch, P. W., Groen, T. A., De Jong, B. H. J., Kanninen, M., Liski, J., Maser, O., Mohren, G.M.J., Nabuurs, G.J., Palosuo, T., Pedroni, L., Vallejo, A., & Vilén, T. (2004). CO2FIX V 3.1 A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems (No. 1068). Alterra-Centrum Ecosystemen, Wageningen, Netherlands.

Tabacchi, G., Di Cosmo, L., Gasparini, P., & Morelli, S. (2011). Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea. Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale, Trento.

Vacchiano, G., Berretti, R., Romano, R., & Motta, R. (2018). Voluntary carbon credits from improved forest management: Policy guidelines and case study. *iForest*, 11, 1–10.

Vitullo, M., De Laurentis, R., & Federici, S. (2007). La contabilità del carbonio contenuto nelle foreste italiane. *Silvae*, 9, 91-104.

Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R. & Mencuccini, M. (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*, 4, 1-63.